

торные сварочные аппараты имеют следующие преимущества: небольшой вес и компактность, что упрощает их транспортировку и эксплуатацию. На сегодняшний день нет среди сварочных аппаратов равных инверторному аппарату. Более того, инвертор – это самый безопасный и наиболее простой в эксплуатации аппарат среди всех приспособлений, предназначенных для сварки разнообразных металлов. С каждым годом его популярность растет.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Welding inverter KEMPPI MINARC 150VRD. Operating manual / Kemppi Oy, –Lahti, 2011 – 18 с.
2. Общие принципы работы инвертора. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://moiinstrumenty.ru/svarochnyj/kak-rabotaet-invertornyj-svarochnyj-apparat.html> – 10.09.2015 г.
3. Устройство сварочного инверторного аппарата. [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://kovka-svarka.ru/2012/01/princip-raboty-invertornogo-svarochnogo-apparata.html> – 10.09.2015 г.

Научный руководитель: С.Н. Кладиев, к.т.н., доцент каф ЭПЭО ЭНИН ТПУ.

#### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОСВЕННЫМ КОНТРОЛЕМ ВЫХОДНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ПЕРЕМЕННЫХ**

А.В. Глазачев<sup>1</sup>, Ю.Н. Дементьев<sup>1</sup>, К.Н. Негодин<sup>3</sup>, А.Д. Умурзакова<sup>4</sup>  
<sup>1,2,3</sup>Томский политехнический университет,  
ЭНИН, ЭПЭО, <sup>3</sup>группа 5Г2А  
<sup>4</sup>Инновационный Евразийский университет

В приводах конвейеров, транспортеров, дозаторов, подъемных механизмов, при транспортировке жидкости, перемещения нефти и нефтепродуктов и т.д. требуется реализация быстродействующего управления электромагнитным моментом исполнительного двигателя и необходим непрерывный контроль его скорости.

Наиболее распространенными в большинстве случаев, в качестве устройств измерения скорости служат импульсные и тахогенераторные датчики [1], балансирные и трансмиссионные динамометры, торсионные приборы, преобразовательные установки для измерения момента [2]. Применение датчиков скорости вращения ротора позволяет получить ка-

чественное и сравнительно простое управление асинхронным двигателем. Однако наличие этих датчиков существенно ухудшает эксплуатационные характеристики электропривода, а их использование может быть невозможным по условиям функционирования электропривода.

В связи с этим широко востребованы устройства и методы, позволяющие проводить непрерывный контроль электромагнитного момента и угловой скорости общепромышленных механизмов в технологическом процессе, мониторинг загрузки исполнительных двигателей, поддерживать скорость вращения двигателя в заданных пределах либо технологический параметр в соответствии с техническими и технологическими требованиями, когда необходимая информация вычисляется косвенными методами.

Целью данной работы является получение аналитических зависимостей, с помощью которых возможно получить математическое описание электропривода с устройством косвенного контроля величин электромагнитного момента и угловой скорости асинхронного двигателя (АД). Причем в отличие от существующих [3-8] в предложенном в работе математическом описании для снижения погрешности при определении величин электромагнитного момента и угловой скорости отсутствуют интегральные составляющие.

Для определения электромагнитного момента и угловой скорости АД используется математическое описание [6], в котором их значения определяются по данным двигателя и легко измеряемым величинам с помощью известных на практике устройств

$$\begin{cases} M(t) = \sqrt{3} p_n (i_a(t) \int [u_b(t) - R_s i_b(t)] dt - i_b(t) \int [u_a(t) - R_s i_a(t)] dt) \\ \omega(t) = \omega_{\text{и}}(t) [1 + \Delta\omega_{\text{инт}}(t) + \Delta\omega_{\text{диф}}(t)] \end{cases}, (1)$$

где

$$\omega_{\text{и}}(t) = \frac{\sqrt{3} [u_a(t) - (R_s + R'_{r\alpha}) i_a(t)]}{\int (R_s [i_a(t) + 2i_b(t)] - [u_a(t) + 2u_b(t)]) dt - L_\beta [i_a(t) + i_b(t)]} - \text{из-}$$

меренное мгновенное значение угловой скорости;

$$\Delta\omega_{\text{инт}}(t) = \frac{\int [u_a(t) - R_s i_a(t)] dt}{T'_r [u_a(t) - (R_s + R'_{r\alpha}) i_a(t)]} \text{ динамическая интегральная со-}$$

ставляющая относительного значения угловой скорости;

$$\Delta\omega_{\text{диф}}(t) = \frac{L_\beta (di_a(t)/dt)}{u_a(t) - (R_s + R'_{r\alpha}) i_a(t)} - \text{динамическая дифференциальная}$$

составляющая относительного значения угловой скорости;  $R'_{r\alpha} = \alpha R'_r$  – активное приведенное сопротивление обмотки ротора с учетом ко-

эффициента  $\alpha$ ;  $R'_r$  – активное приведенное сопротивление ротора;  $\alpha = L_s/L'_r$  – коэффициент, равный отношению полной индуктивности обмотки статора  $L_s$  к приведенной полной индуктивности обмотки ротора  $L'_r$ ;  $L_\beta = \beta L_\mu - L_s$  – индуктивность с учетом коэффициента  $\beta$ ;  $L_\mu$  – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора;  $\beta = L_\mu/L'_r$  – коэффициент, равный отношению взаимной индуктивности  $L_\mu$  к приведенной полной индуктивности обмотки ротора  $L'_r$ ;  $T'_r = L'_r/R'_r$  – постоянная времени ротора.

Наличие интегральных составляющих, имеющих в математическом описании АД с косвенным контролем системой уравнений (1), приводит к появлению погрешностей при определении величин токов и напряжений и может привести к накоплению существенной ошибки в величинах контролируемого электромагнитного момента и угловой скорости АД. Поэтому, если при расчете интегральных составляющих системы уравнений (1) воспользуемся известными математическими выражениями для аналитических сигналов вида

$$u_a(t) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k \sin(k\omega t + \varphi_k) + j \sum_{k=0}^{\infty} A_k \cos(k\omega t + \varphi_k)$$

$$\begin{aligned} \text{Тогда } \int_0^{1/f} [u_a(t) - z i_a(t)] dt &= \int_0^{1/f} \tilde{U}_a(t) dt = \\ &= \int_0^{1/f} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} A_k \left( \sin k\omega^* t + \varphi_k^* + j \cos k\omega^{**} t + j \varphi_k^{**} \right) \right\} dt - \\ &= \int_0^{1/f} \left\{ \sum_{k=0}^{\infty} B_k \sin k\omega^{**} t + \varphi_k^{**} + j \cos k\omega^{**} t + j \varphi_k^{**} \right\} dt. \end{aligned}$$

Используя формулы Эйлера можно перейти от тригонометрических функций к показательным [9-11], а далее используя преобразование Фурье получим

$$u(t) \approx \int_0^N (a(\omega) \cos \omega t + b(\omega) \sin \omega t) dt = \sum_{k=0}^{\infty} (C_k e^{-kt\omega} + C_{-k} e^{kt\omega}) = \sum_{k=0}^{\infty} -C_k^* \sin \omega t.$$

В результате, получим, что интегральная составляющая переходит в свою ортогональную пару, представляющую сумму ряда. Расчеты коэффициентов ряда  $C_k$  можно провести по формулам, представленным в [9, 10].

В окончательном виде с учетом вышеизложенного математическое описание АД с косвенным контролем электромагнитного момента и угловой скорости можно представить следующим образом

$$\begin{cases} M(t) = \sqrt{3} p_n \left[ (1 - R_s) e^{j\frac{\pi}{2}} \left\{ 2i_b(t) \frac{1}{\sqrt{\pi^4 - 4}} - i_a(t) \frac{1}{\sqrt{\pi^4 - 4}} \right\} \right], \\ \omega(t) = \omega_{\text{и}}(t) [1 + \Delta\omega_{\text{инт}}(t) + \Delta\omega_{\text{диф}}(t)] \end{cases}, \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{где } \omega_{\text{и}}(t) &= \frac{\sqrt{3} [u_a(t) - (R_s + R'_{r\alpha}) i_a(t)]}{(R_s - 1) e^{j\frac{\pi}{2}} \left\{ \frac{2}{\sqrt{\pi^4 - 1}} - \frac{1}{\sqrt{\pi^4 - 4}} \right\} - L_\beta [i_a(t) + i_b(t)]} ; \\ \omega_{\text{инт}}(t) &= \frac{e^{j\frac{\pi}{2}} \left\{ \frac{2R_s}{\sqrt{\pi^4 - 1}} - \frac{1}{\sqrt{\pi^4 - 4}} \right\}}{T'_r [u_a(t) - (R_s + R'_{r\alpha}) i_a(t)]} ; \\ \omega_{\text{диф}}(t) &= \frac{L_\beta \frac{di_a(t)}{dt}}{u_a(t) - (R_s + R'_{r\alpha}) i_a(t)}. \end{aligned}$$

В результате можно сделать следующие выводы:

1. Предложенные в работе аналитические зависимости математического описания АД с косвенным контролем выходных механических переменных позволяют проводить расчет значений и непрерывный контроль электромагнитного момента и угловой скорости в электроприводе.
2. Для улучшения качества контроля выходных механических переменных предложено в математическом описании АД с косвенным контролем электромагнитного момента и угловой скорости исключить интегральную составляющую переходом в ортогональную пару, используя преобразования Фурье, Эйлера, Парсевалья.

Работа была выполнена в рамках Госзадания «Наука», проект №3852.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Лейтман М.Б. Автоматическое измерение выходных параметров электродвигателей / М.Б. Лейтман. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 152 с.

2. Левинтов С.Д. Бесконтактные магнитоупругие датчики крутящего момента / А.М. Борисов. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 88 с.
3. Дементьев Ю.Н., Умурзакова А.Д., Мельников В.Ю. Способ измерения угловой скорости вращения трехфазного асинхронного электродвигателя // Патент на изобретение РФ № 2525604, 2014. Бюл. № 23.
4. Дементьев Ю. Н. Алгоритм и способ измерения угловой скорости вращения двигателя в асинхронном электроприводе / А.Д. Умурзакова, К. В. Хацевский // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 1. – с. 393–396.
5. Дементьев Ю. Н. Алгоритм контроля угловой скорости двигателя в асинхронном электроприводе / А. Д. Умурзакова // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока – 2013. – № 1. – с. 270 –272.
6. Дементьев Ю. Н. Измерение механических координат двигателя в асинхронном электроприводе / А. Д. Умурзакова, О. В. Арсентьев // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2013. – № 7. – с. 127–132.
7. Дементьев Ю. Н. Моделирование асинхронного двигателя с устройством косвенного измерения момента / А.Д. Умурзакова, Л.С Удут // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12. – с. 931–935.
8. Дементьев Ю. Н. Модель асинхронного электродвигателя для измерения механических координат / А.Д. Умурзакова, К. В. Хацевский // Омский научный вестник. – 2013. – № 3. – с. 200–205.
9. Диткин В.А. Интегральные преобразования и операционное исчисление / А.П. Прудников. – М.: Наука, 1974. – 542 с.
10. Красс М.С. Основы математики и ее приложения/ Б.П. Чурпынов. – М.: Дело, 2003. – 688 с.
11. Пантелеев А.В. Теория управления в примерах и задачах / А.С. Бортаковский. – М.: Высшая школа, 2003. – 583 с.

Научный руководитель: А.В. Глазачев, к.т.н., доцент каф. ЭПЭО ЭНИН ТПУ.